

**С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ****СПОСІБ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРУБЧАСТИХ НЕФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ З ПЕРЕТИНОМ У ВИГЛЯДІ КОЛА**

Наведено опис поточної економічної та технологічної ситуації щодо сфери застосування електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю трубчастих металовиробів в сучасній українській економічній ситуації. Описано труднощі і технічні проблеми, а також фінансова ресурсомісткість застосування класичних способів неруйнівного контролю при контролі трубчастих виробів, в тому числі зі складною структурою поверхні, при виявленні дефектів. Наведено поширені види дефектів, які можуть виникати в металовиробах трубчастого типу. Охарактеризовані загальні можливості електромагнітно-акустичного методу перетворення для збудження ультразвукових коливань. Наведено короткий опис електромагнітно-акустичних перетворювачів. Вказані найбільш значущі відомі недоліки електромагнітно-акустичних перетворювачів. Показана ефективність застосування крутильних коливань в підвищенні чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів. Наведено опис розробленого методу контролю трубчастих металовиробів електромагнітно-акустичним методом за допомогою відповідних перетворювачів. Описано і схематично визуалізовано рішення для електромагнітно-акустичного перетворювача, що використовує крутильні хвилі при контролі трубчастих металовиробів. Охарактеризовані окремо і у взаємозв'язку структурні компоненти запропонованого рішення. Наведено, поставлена і вирішена задача підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за допомогою порушення і прийому бездисперсійних ультразвукових імпульсів. Наведено схему і описано пристрій електромагнітно-акустичного перетворювача, заснованого на наведеному в роботі вирішенні завдання підвищення чутливості за допомогою порушення і прийому бездисперсійних ультразвукових імпульсів. Виконана і охарактеризована проведена експериментальна оцінка ефективності розробленого методу. Продемонстрована висока здатність розробленого методу електромагнітно-акустичного контролю до виявлення дефектів трубчастих ферромагнітних металовиробів.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, електромагнітно-акустичний перетворювач, метод, модель, експериментальні дослідження, дефекти металу, металовироби, трубчасті вироби.

**С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ****МЕТОД И ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТРУБЧАТЫХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С СЕЧЕНИЕМ В ВИДЕ КРУГА**

Приведено описание текущей экономической и технологической ситуации относительно сферы применимости электромагнитно-акустических преобразователей для контроля трубчатых металлоизделий в современной украинской экономической ситуации. Описаны трудности и технические проблемы, а также финансовая ресурсоемкость применения классических способов неразрушающего контроля при контроле трубчатых изделий, в том числе со сложной структурой поверхности, при выявлении дефектов. Приведены распространенные виды дефектов, которые могут возникать в металлоизделиях трубчатого типа. Охарактеризованы общие возможности электромагнитно-акустического метода преобразования для возбуждения ультразвуковых колебаний. Приведено краткое описание электромагнитно-акустических преобразователей. Указаны наиболее значимые известные недостатки электромагнитно-акустических преобразователей. Показана эффективность применения крутильных колебаний в повышении чувствительности электромагнитно-акустических преобразователей. Приведено описание разработанного метода контроля трубчатых металлоизделий электромагнитно-акустическим методом при помощи соответствующих преобразователей. Описано и схематически визуализировано решение для электромагнитно-акустического преобразователя, использующего крутильные волны при контроле трубчатых металлоизделий. Охарактеризованы отдельно и во взаимосвязи структурные компоненты предложенного решения. Приведена, поставлена и решена задача повышения чувствительности электромагнитно-акустического контроля посредством возбуждения и приема бездисперсионных ультразвуковых импульсов. Приведена схема и описано устройства электромагнитно-акустического преобразователя, основанного на приведенном в работе решении задачи повышения чувствительности посредством возбуждения и приема бездисперсионных ультразвуковых импульсов. Выполнена и охарактеризована проведенная экспериментальная оценка эффективности разработанного метода. Продемонстрирована высокая способность разработанного метода электромагнитно-акустического контроля к выявлению дефектов трубчатых ферромагнитных металлоизделий.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, метод, модель, экспериментальные исследования, дефекты металла, металлоизделия, трубчатые изделия.

**S. Yu. PLESNETSOV****METHOD AND ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCER FOR TESTING OF NON-FERROMAGNETIC METAL PRODUCTS OF CIRCULAR CROSS-SECTION**

The description of the current economic and technological situation regarding the scope of applicability of electromagnetic-acoustic transducers for the control of tubular hardware in the current Ukrainian economic situation is given. Difficulties and technical problems are described, as well as the financial resource-intensiveness of using classical methods of non-destructive testing in the control of tubular products, including those with a complex surface structure, in identifying defects. The common types of defects that can occur in tubular-type hardware are given. The general possibilities of the electromagnetic-acoustic conversion method for the excitation of ultrasonic oscillations are described. A brief description of the electromagnetic-acoustic transducers is given. The most significant known disadvantages of electromagnetic-acoustic transducers are indicated. The efficiency of using torsional vibrations in increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers is shown. The description of the developed method for the control of tubular metal products by the electromagnetic-acoustic method using appropriate transducers is given. A solution for an electromagnetic-acoustic transducer using torsional waves when inspecting tubular hardware is described and schematically visualized. The structural components of the proposed solution are characterized separately and in interrelation. The problem of increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic control by means of excitation and reception of dispersionless ultrasonic pulses is given, stated and solved. A diagram is given and devices for an electromagnetic-acoustic transducer are described, based on the solution of the problem of increasing sensitivity through the excitation and reception of dispersionless ultrasonic pulses. The experimental evaluation of the effectiveness of the developed method was carried out and characterized. The demonstrated high ability of the developed method of electromagnetic-acoustic control to detect defects in tubular non-ferromagnetic hardware.

**Keywords:** ultrasonic testing, electromagnetic-acoustic transducer, method, model, experimental studies, metal defects, metal products, tubular products.

**Вступ.** Технічний розвиток в країні визначається двома основними напрямками. Наявністю досконалих технологій отримання нових матеріалів, речовин та виробів і відповідних методів та засобів контролю і діагностики, як при виробництві, так і при експлуатації [1].

Значні складнощі виникають під час виконання контролю неферомагнітних металевих виробів [2], з яких найбільш поширеними є трубчаті вироби з круговим перетином. Наявність фарби, бруду, іржі та інших дефектів (рис. 1, а) вимагають значних матеріальних втрат для спеціальної підготовки поверхні об'єкту контролю (ОК) [3]. До того ж, традиційний ультразвуковий контроль катаних виробів типу трубок незначного кругового перетину вимагають значних втрат часу на проведення дефектоскопії [4].

При цьому трубчасті вироби підвернені великому переліку можливих дефектів, що можуть виникати при

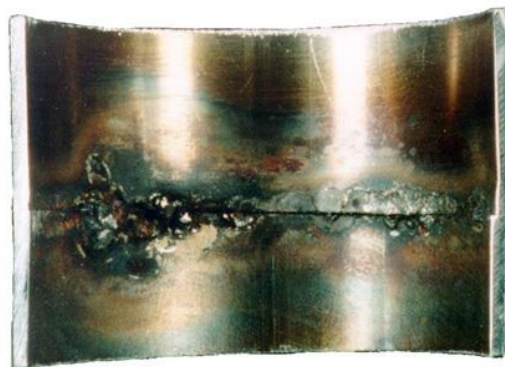
виробництві, зборці (рис. 1, б), використанні (рис. 1, а, в), та можуть проявлятися як на макро-, так і на мікрорівні (рис. 1, г).

Як показано в роботі [5] вирішити проблему можливо за рахунок використання безконтактного ультразвукового електромагнітно-акустичного (ЕМА) методу збудження та прийому ультразвукових імпульсів.

Електромагнітно-акустичний перетворювач (ЕМАП, рис. 2) – перетворювач для безконтактного збудження та прийому акустичного сигналу за допомогою електромагнітних механізмів. ЕМАП – основа методу ультразвукового неруйнівного контролю, який є особливо корисним для автоматизованого огляду, особливо в складних умовах. ЕМАП дозволяють створювати поверхневі хвилі, але вважаються недостатньо чутливими.



а



б



в



г

Рис. 1 – Дефекти металовиробів: а – металевий трубчастий виріб із значним заіржавлінням внутрішньої частини; б – дефект з'єднання металевих труб; в – кородування поверхні металевого трубчастого виробу; г – дефект мікроструктури трубчастого виробу

Останню проблему можна вирішити за допомогою використання ультразвукових крутильних коливань [6].

Навіть приймаючи до уваги відносно незначний обсяг досліджень щодо можливостей ЕМАП, на

сьогодні для трубок з перетином у вигляді кола з неферомагнітного матеріалу, відповідні розробки взагалі відсутні [7]. Тому розробка методу і засобу контролю високоефективними ультразвуковими імпульсами крутильних коливань є актуальною.



Рис. 2 – Дефектоскоп з електромагнітно-акустичним перетворювачем

**Мета роботи.** Створення методу та засобу для ультразвукового ЕМА контролю імпульсами крутильних коливань трубок з круглим перетином, виготовлених з неферомагнітних металів з незначною величиною перетину.

На відмінність від випадку ультразвукового контролю виробів з феромагнітних матеріалів є проблема формування поляризованого магнітного поля в шарі ОК, виготовленого з неферомагнітного матеріалу. Цю проблему можливо вирішити для трубчатих виробів з круговим перетином. Якщо джерело поляризованого магнітного поля може формувати магнітне поле, силові лінії якого мають форму кола, то необхідно розробити його конструкцію так, щоб силові лінії колісно суміщувалися з поверхнею ОК. Суть пропозиції пояснюється з допомогою рис.3.

Викладемо сутність методу збудження ультразвукових хвиль в неферомагнітному ОК. Джерело 2 поляризованого магнітного поля розміщується в центрі виробу, що контролюється 1. При цьому джерело 2 магнітного поля необхідно виконувати у вигляді провідника постійного струму. Силові магнітні лінії 3 такого джерела мають форму кола. Розміщення джерела 2 в центрі трубчастого виробу 1 забезпечує формування поляризованого кругового магнітного поля в поверхневому шарі ОК 1.

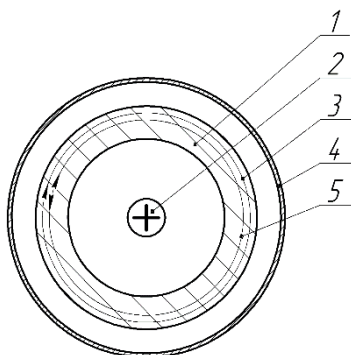


Рис.3 – Схема реалізації методу ультразвукового контролю крутильними хвилями виробу з неферомагнітного матеріалу

Для збудження ультразвукових хвиль в ОК 1 необхідно в його поверхневому шарі, одночасно з формуванням поляризованого магнітного поля, збуджувати імпульси високочастотного струму. Для цього концентрично поверхні ОК 1 розміщується котушка індуктивності 4, яка формує в поверхневому шарі виробу 1 імпульси високочастотного струму 5. Взаємодія поляризованого магнітного поля і високочастотного струму 5 в поверхневому шарі ОК 1 призводить до збудження торсійних (крутильних) ультразвукових імпульсів в виробі 1. Ультразвукові імпульси розповсюджуються вздовж виробу 1 і можуть використовуватися для дефектоскопії, визначення розмірів та фізико-механічних властивостей матеріалу ОК 1.

Прийом крутильних ультразвукових імпульсів з ОК 1 може виконуватися за рахунок зворотнього ЕМА перетворення. Коли ультразвукові коливання надходять в зону дії поляризованого магнітного поля в поверхні ОК 1 збуджуються високочастотні вихрові струми. Ці струми формують біля поверхні виробу 1 високочастотне електромагнітне поле. Високочастотне електромагнітне поле наводить в котушці індуктивності 4 ЕРС, яка несе інформацію про наявність дефектів, розміри та фізико-механічні характеристики матеріалу ОК 1.

Для реалізації розробленого методу запропоновано електромагнітно-акустичний перетворювач, який може бути використаний, наприклад, для виявлення дефектів за допомогою ультразвукових імпульсів бездисперсійних крутильних хвиль у трубчатих виробках з неферомагнітного металу. Перетин контролюємих виробів повинен мати круглий. Зовнішній діаметр ОК, які підлягають контролю, не повинні перевищувати 30...50 мм залежно від матеріалу. Внутрішній діаметр повинен мати розмір, який забезпечує розміщення дроту джерела поляризованого магнітного поля, як правило 2...3 мм.

В основу розробки ЕМАП поставлено задачу створити засіб, нове виконання якого дозволило б збуджувати і приймати крутильні бездисперсійні ультразвукові імпульси і за рахунок цього підвищити достовірність виявлення дефектів в тілі ОК.

Задача вирішується наступним чином. В електромагнітно – акустичному перетворювачі [8] для контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола, що має корпус, джерело постійного магнітного поля, прохідну високочастотну котушку індуктивності та протектор, прохідна високочастотна котушка індуктивності виконана з двох секцій, які електрично включені по відношенню одна до одної зустрічно по магнітному полю, а джерело постійного магнітного поля виконано у вигляді окремого провідника, який встановлено у внутрішньому об'ємі трубчастого виробу так, що його вісь співпадає з віссю трубчастого виробу.

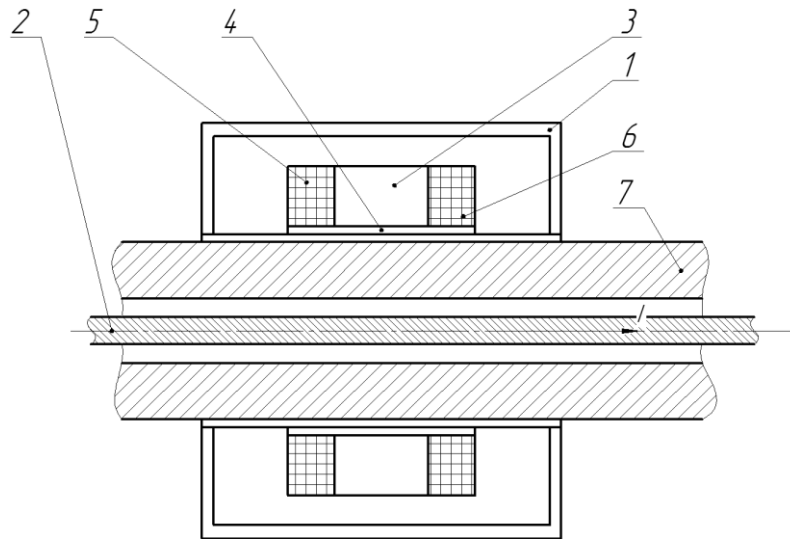


Рис. 4 – Ескіз електромагнітно-акустичного перетворювача для контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола [8]

На рис. 4 позначено: 1 – корпус; 2 – джерело постійного магнітного поля у вигляді окремого провідника; 3 – прохідна високочастотна котушки індуктивності; 4 – протектор; 5 – перша секція прохідної високочастотної котушки індуктивності; 6 – друга секція прохідної високочастотної котушки індуктивності; 7 – ОК;  $I$  – постійний електричний струм.

ЕМАП працює наступним чином. У порожнині трубчатого виробу 7, співвісно з ним, розташований провідник 2, по якому протікає постійний електричний струм  $I$ . Струм  $I$  в провіднику 2 є в тілі ОК 7 джерелом постійного поляризовуючого магнітного поля, вектор напруженості якого в циліндричній системі координат має один круговий компонент. Прокідна високочастотна котушки 3 індуктивності закріплена в корпусі 1 і живиться високочастотним струмом. Високочастотний струм в секції 5 і в секції 6 високочастотної котушки 3 індуктивності відносно один одного протилежні за напрямком. За рахунок взаємодії магнітного поляризовуючого поля кругової форми, що формується струм  $I$  в ОК 7, і високочастотного електромагнітного поля, що формується секціями 5 і 6 високочастотної котушки 3 індуктивності та дії сили Лоренца в тілі ОК 7 збуджуються зсувні деформації. В результаті в ОК 7 розповсюджуються крутильні бездисперсійні ультразвукові коливання. При наявності в ОК 7 дефектів ультразвукові коливання відбиваються від них і фіксуються за рахунок ефекту електромагнітної індукції. Протектор 4 захищає високочастотну котушки 3 індуктивності від пошкодження при скануванні ОК.

Перевірка розробленого методу та ЕМА перетворювача виконана на відрізку труби діаметром 32 мм з товщиною 3,2 мм, виготовленої зі сталі ст.3. У візці для дослідження було виконано поздовжню модель дефекту глибиною 0,2 мм та довжиною 20 мм. Джерело живлення виготовлено з мідного дроту діаметром 2,4 мм. Живлення джерела магнітного поля виконувалося імпульсами струму прямокутної форми

часової тривалістю 1 ms. Сила струму складала близько 2000 А. Секції котушки індуктивності намотані дротом діаметром 0,2 мм і мають по 16 витків кожна. Кількість секцій – 8 шт. Високочастотна котушка індуктивності ЕМАП живилася від генератора зондуючи імпульсів струмом з піковим значенням до 200 А, часовою тривалістю від 1 до 10 періодів частоти заповнення, яка регулювалася в інтервалі 0,1–1,5 МГц. В результаті досліджень виявлялася модель дефекту з відношенням амплітуд відбитого сигналу та шуму 7-8 разів.

Таким чином, технічним результатом розробки є те, що ЕМА перетворювач даної конструкції має достатньо високу здатність до виявлення дефектів. В результаті достовірність ультразвукового контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів буде підвищуватися.

#### Список літератури

1. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. *Неруйнівний контроль в Україні*. Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. –2003. –№ 2(18). – С. 5–9.
2. *Неврушающий контроль: Справочник: В 7 т.* Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Плєснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор) // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. №2. С. 24–31.
4. Ноздрачова К.Л. *Експрес-метод ультразвукового контролю довгомірних виробів*. Дис. к.т.н. НТУ «ХПІ», Харків, 2011. 179 с.
5. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно – акустического контроля металлоизделий. Дис. д.т.н. НТУ «ХПІ», Харків, 2005. 521 с.
6. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. part 3. // *Технічна електродинаміка*. 2018. №3. С. 10–19.
7. Сучков Г.М., Плєснецов С.Ю., Мещеряков С.Ю., Юданова Н.Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор) // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. №3. С. 10.
8. Плєснецов С.Ю., Петрищев О.М., Сучков Г.М., Мітін О.В. Електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола. Україна. Патент на корисну модель №117766. 2017.

## References (transliterated)

1. Paton B. Je., Trojickij V. O., Posypajko Ju. M. *Nerujnivnyj kontrolj v Ukrajinі* [Nondestructive testing in Ukraine]. Inform. bjul. Ukrajinjskogho tovarystva nerujnivnogho kontrolju ta tekhnichnoji dyaghnostyky. 2003.No 2(18). P. 5–9.
2. Y.N. Ermolov, Ju.V. Langhe. *Nerazrushajushhyj kontrolj: Spravochnyk: V 7 t.* [Nondestructive testing: Handbok. In 7 volumes] Ed. V.V. Kljuev. T.3: *Ul'trazvukovoj kontrolj* [Volume 3. Ultrasonic testing] /. Moscow: Mashynostroenye, 2004. 864 p.
3. Plesnecov S.Ju., Suchkov Gh.M., Korzh A.Y., Suvorova M.D. *Novye teoretycheskye yssledovanyja y razrabotky v oblasti elektromagnitno-akustycheskogho preobrazovanyja. (Obzor)* [New theoretical research in the area of electromagnetic-acoustic transduction (Review)]. Tekhnicheskaja dyaghnostyka y nerazrushajushhyj kontrolj. 2018. No2. P. 24–31.
4. Nozdrachova K. L. *Ekspres – metod ul'trazvukovogo kontrolyu dovgomirnyh vyrobiv: dys. kand. tehn. nauk* [Express-method of elongated product ultrasonic testing. PhD dissertation]. 05.11.13. – Kharkiv, 2011.
5. Suchkov Gh.M. *Razvytye teoryy y praktyky sozdanyja pryborov dlja elektromagnitno – akustycheskogho kontrolja metalloyzdebyj* [Development of theory and practice of metal product electromagnetic-acoustic testing device creation]. D.t.s. diss. NTU «KhPI», Kharkiv, 2005. 521 p.
6. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. *Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3.* Tekhnichna elektrodynamika. 2018. No3. P. 10–19.
7. Suchkov Gh.M., Plesnecov S.Ju., Meshherjakov S.Ju., Judanova N.N. *Novye razrabotky elektromagnitno-akustycheskykh preobrazovatelej (obzor)* [New developments in production of electromagnetic-acoustic transducers (review)]. Tekhnicheskaja dyaghnostyka y nerazrushajushhyj kontrolj. 2018. No3. P.10.
8. Plesnetsov S.Yu., Petryshhev O.M., Suchkov G.M., Mitin O.V. *Elektromagnitno – akustychnyj peretvorjuvach dlja kontrolju trubchatykh neferomagnitnykh metalovyrobiv z peretynom u vyghljadi kola. Ukrajin. Patent na korysnu modelj* [Electromagnetic-acoustic transducer for testing of tubular nonferromagnetic metal product of circular section. Patent on useful model]. No 117766. 2017.

Надійшла (received) 27.10.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich)** – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: [s.plesnetsov@gmail.com](mailto:s.plesnetsov@gmail.com)